



### **Science Arts & Métiers (SAM)**

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/9936>

#### **To cite this version :**

Romain PIQUARD, Alexandre GILBIN, Alain D'ACUNTO, Michaël FONTAINE, Daniel DUDZINSKI, Sébastien THIBAUD - Expérimentation de la micro-coupe élémentaire sur un acier dur et comparaison au micro-fraisage - In: Machines et Usinage à Grande Vitesse, France, 2014-10-15 - Assises Machines et Usinage à Grande Vitesse 2014 - 2014

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [scienceouverte@ensam.eu](mailto:scienceouverte@ensam.eu)



## EXPERIMENTATION DE LA MICRO-COUBE ELEMENTAIRE SUR UN ACIER DUR ET COMPARAISON AU MICRO- FRAISAGE

**Romain PIQUARD**

FEMTO-ST UMR 6174 (CNRS/UFC/ENSMM/UTBM), 24, rue de l'épître, 25000 Besançon,  
romain.piquard@femto-st.fr

**Alexandre GILBIN**

FEMTO-ST UMR 6174 (CNRS/UFC/ENSMM/UTBM), 24, rue de l'épître, 25000 Besançon,  
alexandre.gilbin@ens2m.fr

**Alain D'ACUNTO**

LEM3 UMR CNRS 7239, Arts et Métiers ParisTech, 4, rue Augustin Fresnel, 57070 Metz,  
alain.dacunto@ensam.eu

**Michaël FONTAINE**

FEMTO-ST UMR 6174 (CNRS/UFC/ENSMM/UTBM), 24, rue de l'épître, 25000 Besançon,  
michael.fontaine@ens2m.fr

**Daniel DUDZINSKI**

LEM3 UMR CNRS 7239, Université de Lorraine, 4, rue Augustin Fresnel, 57070 Metz,  
daniel.dudzinski@univ-lorraine.fr

**Sébastien THIBAUD**

FEMTO-ST UMR 6174 (CNRS/UFC/ENSMM/UTBM), 24, rue de l'épître, 25000 Besançon,  
sebastien.thibaud@ens2m.fr

**Résumé :** *Cet article présente des essais de micro-coupe orthogonale et oblique à partir de tournage sur un acier 40NiCrMo16. Les résultats obtenus démontrent l'influence du rayon d'acuité d'arête sur les efforts mesurés notamment aux faibles épaisseurs de copeau non déformé. Les efforts spécifiques de coupe déduits sont en cohérence avec ceux obtenus lors d'essais de micro-fraisage issus de travaux précédents. Pour compléter l'étude, cet article pose les bases de la modélisation phénoménologique et thermomécanique adaptée à la micro-coupe. Le but à terme est d'obtenir un modèle de coupe élémentaire utilisable dans le cas du micro-fraisage puis de comparer les résultats obtenus aux résultats expérimentaux.*

**Mots clés :** Micro-coupe ; Coupe élémentaire ; Micro-fraisage ; Modélisation

**Abstract:** *This paper focuses on orthogonal and oblique micro-cutting experiments conducted on AISI 6F7 tool steel. Results show the influence of cutting edge radius on cutting forces in particular at low uncut chip thickness. The deduced specific cutting forces have shown a good agreement with micro milling ones coming from a previous work. In order to complete this study, the basis of phenomenological and thermo-mechanical modelling of micro-cutting are discussed. The final aim is to obtain a model of elementary cutting that can be used simulate micro-milling process and then to compare the results with experimental data.*

**Keywords:** Micro-cutting; Elementary cutting; Micro-milling; Modelling

## 1 Introduction

Le micro-usinage est assez récent comparé à l'usinage conventionnel. Le micro-fraisage, procédé caractéristique du micro-usinage, se caractérise principalement par les outils utilisés dont le diamètre est inférieur à 1 mm et peut atteindre 50  $\mu\text{m}$  [1]. Ces outils n'ont plus les géométries complexes et saillantes des outils conventionnels du fait de la difficulté de taillage et d'affutage. Avec des outils si petits, les paramètres de coupe sont aussi très différents de l'usinage conventionnel, et certains fabricants préconisent des conditions « adaptées » au diamètre de la fraise : ainsi, il est possible d'obtenir des profondeurs de passe et des avances par dent ne dépassant pas quelques microns, et des vitesses de rotation de broche supérieures à 100 000 tr/min pour obtenir des vitesses de coupe suffisantes. Cependant l'approche « top-down » utilisé en micro-fraisage consistant à faire une homothétie du procédé conventionnel fait apparaître des effets d'échelle. L'effet d'échelle se définit comme la divergence de certains paramètres caractéristiques de leur valeurs théoriques définies à une échelle de référence. Par exemple le rayon d'acuité d'arête est plus grand en micro-fraisage qu'en fraisage conventionnel proportionnellement à l'échelle d'étude (on parle aussi du rapport rayon d'acuité/épaisseur coupée plus important à l'échelle micro).

Ces effets d'échelle sont les principaux verrous scientifiques dans la compréhension des mécanismes de la micro-coupe et font l'objet de la majorité des études scientifiques sur ce sujet notamment par l'étude des efforts de coupe. Néanmoins la plupart des auteurs appliquent un modèle d'effort issu de l'échelle macro directement au cas du micro-fraisage, ce qui peut poser certains problèmes pour dissocier et identifier les effets dynamiques, les effets géométriques et les effets de la coupe proprement dite à partir de l'analyse des efforts et des états de surfaces obtenus. Par exemple Bissacco [2] propose un modèle basé sur l'approche d'Armarego et utilisé pour le micro-fraisage en prenant en compte le faux-rond d'outil, mesuré sur la machine, aboutissant théoriquement à des efforts différents pour chaque dent. Les efforts mesurés lors des essais de validation associés ne présentent pas cette particularité, probablement en conséquence de la flexion d'outil équilibrant les efforts sur chaque dent. Ainsi un modèle purement géométrique est difficilement exploitable.

Concernant les modèles d'efforts de coupe orthogonale, la plupart sont issus de résultats numériques. Altintas et Jin [3] modélisent les efforts de coupe  $F_t$  suivant la vitesse de coupe (tangentielle dans le cas du micro-fraisage) et  $F_f$  suivant une direction orthogonale (radiale dans le cas du micro-fraisage), de la façon suivante :

$$F_{t,f} = K_{t,f}(h, r_\beta)hw = (\alpha_{t,f}h^{d_{t,f}} + \beta_{t,f}h^{p_{t,f}}r_\beta^{q_{t,f}})hw \quad (1)$$

où  $h$  est l'épaisseur de copeau non coupé et  $w$  est la largeur coupée. Les coefficients  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $d$ ,  $p$  et  $q$  sont des constantes. Les efforts  $F_c$  et  $F_t$  sont ainsi liés directement à la section coupée par le coefficient  $K_i$  qui pour sa part est constitué d'un terme dépendant du rayon d'acuité d'arête. Afazov et al. [4] proposent une modélisation dépendante de la vitesse de coupe :

$$F_{c,t} = (p_1v_c^{p_2})[1 - e^{p_3h}] + (p_4v_c + p_5)[1 - e^{p_6h}] \quad (2)$$

où les coefficients  $p_i$  sont des constantes. Ce modèle ne fait pas intervenir le rayon d'acuité d'arête mais celui-ci est pris en compte dans la géométrie de l'outil utilisé dans la simulation.

D'autres ajoutent au terme d'effort dû au cisaillement un terme permettant de prendre en compte le frottement [5–7]. Ce terme faisant intervenir la dureté ainsi que le module d'Young du matériau usiné représente l'effet de labourage.

Ces modèles montrent que les efforts de coupe ne sont pas des fonctions affines mais augmentent rapidement pour de faibles épaisseurs de copeau non coupé pour se stabiliser vers un modèle plus linéaire démontrant ainsi l'influence du rayon d'acuité d'arête pour un rapport  $h/r_\beta$  proche de 1 pour la plupart des matériaux.

Cet article présente une approche expérimentale de la micro-coupe permettant de mettre en évidence les effets observable en micro-usinage, tout en s'absolvant des considérations dynamiques inévitables en micro-fraisage.

## 2 Méthodologie

Une solution pour se soustraire à certains de ces problèmes est de passer par un cas plus simple, en l'occurrence la micro-coupe élémentaire où l'hypothèse d'un outil rigide est plus adaptée et la coupe est continue. Il est alors plus facile de définir un modèle prenant en compte seulement les aspects géométriques. Ensuite ce modèle peut être appliqué au cas du micro-fraisage et enrichi pour prendre justement en compte d'autres effets, comme les effets dynamiques.

Dans un premier temps des essais de coupe élémentaires sont effectués. Les essais de coupe élémentaire peuvent être effectués de plusieurs manières : par rabotage, par tournage de disque (dressage) ou de tube (chariotage). Cette dernière option a été retenue est appliquée directement sur centre de fraisage. Un modèle phénoménologique a été déduit des résultats obtenus en prenant en compte le rayon d'acuité d'arête.

### 2.1 Expérimentation de la micro-coupe élémentaire

L'approche expérimentale retenue est le chariotage de tube. L'utilisation du centre de fraisage Röders RP600 a permis de tourner un tube disposé dans la broche. Cette configuration permet de mettre à profit la dynamique d'une machine UGV tout en utilisant des outils de tournage rigides, à géométrie simple et à prix modéré. Le tube est également ébauché directement sur le banc expérimental afin d'obtenir la largeur de coupe désirée ainsi qu'un faux rond limité (figure 1). Les conditions de coupe pour les essais sont définies par les limites technologiques des machines disponibles. Malgré tout, des contraintes inhérentes à la micro-coupe sur tube doivent être prises en comptes : l'épaisseur de copeau non coupée doit être petite devant la largeur de coupe pour pouvoir négliger les effets de bords, et cette largeur ne doit pas être trop importante pour ne pas avoir une variation trop importante de la vitesse de coupe le long de l'arête.

Connaissant toutes ces contraintes, les dimensions retenues pour le tube sont un diamètre moyen de 6,366 mm et une épaisseur du tube de 318  $\mu\text{m}$ . Cette épaisseur est calculée pour avoir une variation de vitesse de coupe le long de l'arête de 10%, ainsi qu'une hauteur de copeau non déformé limitée à 32  $\mu\text{m}$ .

Les efforts sont mesurés à l'aide d'une platine dynamométrique Kistler Minidyn 9256 C2. L'outil étant fixé sur cette platine, les efforts mesurés ont alors une allure de créneau correspondant aux efforts du matériau usiné sur l'outil. Ces efforts étant donnés dans le repère de la platine dynamométrique, une transformation géométrique est nécessaire pour obtenir les composantes d'efforts dans le repère outil. De plus la mesure des créneaux est automatisée pour

réduire le temps d'analyse. Un effort moyen est calculé sur les trois quarts des points acquis du plateau détecté après redressement du signal brut (offset et dérive linéaire).

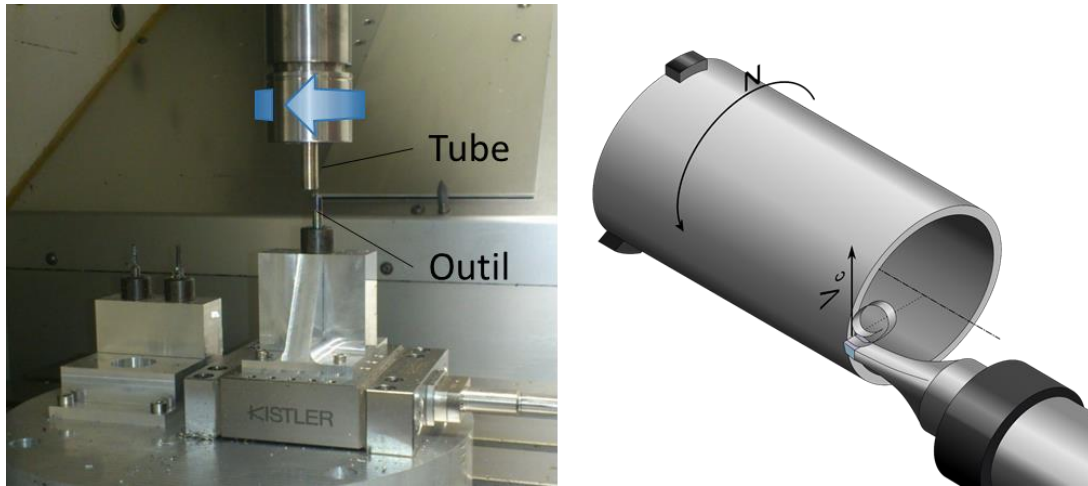


Fig. 1 : Banc expérimental de micro-coupe élémentaire sur centre d'usinage.

## 2.2 Essais réalisés

Les essais présentés ici ont été réalisés sur un acier 40NiCrMo16. Concernant les conditions de coupe, la vitesse de coupe est de 60 m/min (3000 tr/min), la hauteur de coupe est comprise entre 0,165  $\mu\text{m}$  et 12  $\mu\text{m}$ . Deux angles de coupe ( $8^\circ$  et  $-8^\circ$ ) ont été testés en coupe orthogonale ainsi qu'en coupe oblique ( $\lambda_s = 30^\circ$ ).

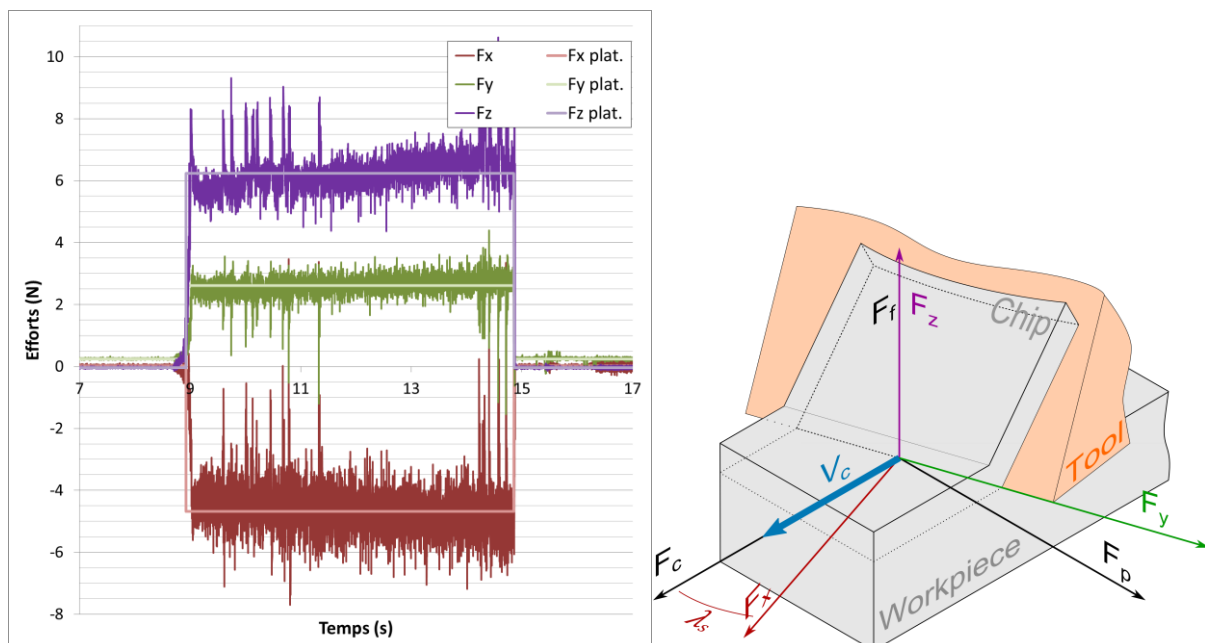


Fig. 2 : Efforts mesurés lors d'un essai de coupe oblique ( $h = 0,6 \mu\text{m}$ ).

Les rayons d'acuité d'arête de ces outils (IFANGER MTNY-41015-R revêtu TiAlN) ont été mesurés à l'aide d'un microscope Alicona Infinite Focus (objectif X100) et ont une valeur moyenne de  $1,3 \mu\text{m}$ .

### 3 Résultats

#### 3.1 Modélisation proposée

En traçant les efforts en fonctions de la hauteur coupée (figure 3), on remarque un saut d'effort pour les plus faibles avances pour tous les essais. Le saut observé est sans doute dû au phénomène d'écrouissage. En effet sous l'action de labourage une faible épaisseur de l'éprouvette est écrouie. L'essai étant cyclique (l'essai se fait sur plusieurs tours), le phénomène s'accroît si l'épaisseur de copeau non coupé est plus faible que l'épaisseur écrouie. Au contraire si l'épaisseur de copeau est plus importante, la surface écrouie au tour précédent est évacuée dans le copeau et une nouvelle surface écrouie apparaît, l'accumulation n'a pas lieu. Ce phénomène a déjà été observé par Fleischer [8], lorsque le ratio  $r_\beta/h$  est proche de 1. Il est à noter que les efforts de coupe sont continus pour les faibles épaisseurs alors qu'on pourrait s'attendre à un phénomène de coupe intermittente donnant lieu à des efforts irréguliers. En observant ces essais à l'aide d'un microscope USB, il est tout de même apparu qu'il n'y a pas de formation de copeau continu mais une formation irrégulière de micro-copeaux, ceci à une fréquence sans doute supérieure à la fréquence d'acquisition voire même de la platine.

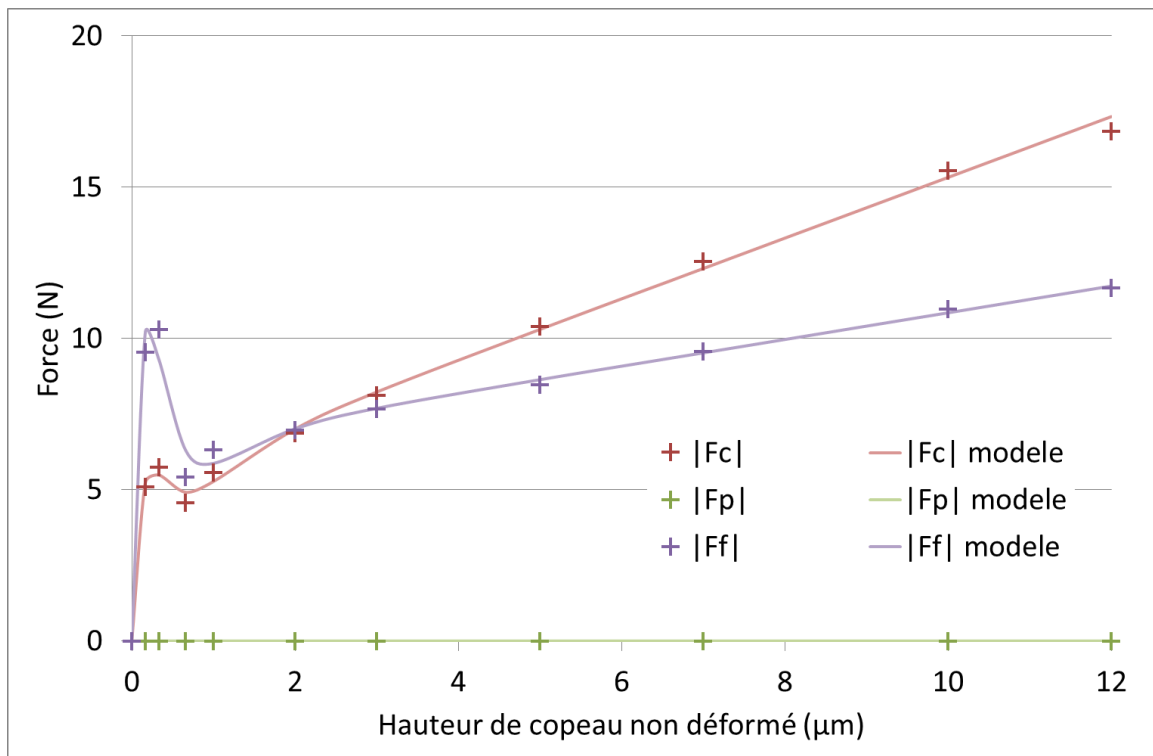


Fig. 3 : Efforts mesurés en fonction de l'épaisseur coupée et modèle associé en coupe orthogonale.

Pour prendre en compte ce saut dans un modèle phénoménologique, il faut que ce modèle soit décomposé en deux termes : le premier valable aux faibles avances et le second aux plus grandes. Ainsi le modèle proposé est le suivant :

$$F_c = K_1 \cdot h (e^{-\alpha_1 h}) + (K_2 \cdot h + K_3) \cdot (1 - e^{-\alpha_2 h}) \quad (3)$$

où les coefficients  $K_i$  et  $\alpha_i$  sont des constantes dépendantes du matériau et de la géométrie de l'outil. Le premier terme est une fonction linéaire pondérée par un facteur de saturation qui tend vers 0 lorsque  $h$  augmente. Ce terme peut être considéré comme la représentation de l'effet du rayon d'acuité d'arête. Le second terme est une fonction affine pondérée par un facteur de saturation nul en 0 et qui tend vers 1 lorsque  $h$  augmente. Le saut d'effort représente alors la transition entre les deux termes.

MIC2M [9] est un logiciel programmé dans MATLAB permettant d'identification de paramètres à partir de l'algorithme de Levenberg et Marquardt ou d'un algorithme génétique. Un module a été implémenté dans MIC2M pour l'identification des différents coefficients directement à partir des résultats de micro-coupe et du modèle phénoménologique décrit précédemment (éq. 2). Les coefficients pour l'effort de coupe sont les suivants :

Coefficients	Angle de coupe $\gamma = 8^\circ$		Angle de coupe $\gamma = -8^\circ$	
	$\lambda_s = 0^\circ$	$\lambda_s = 30^\circ$	$\lambda_s = 0^\circ$	$\lambda_s = 30^\circ$
$K_1$ (N/ $\mu\text{m}$ )	59,78	56,25	4148,17	139,53
$\alpha_1$ ( $\mu\text{m}^{-1}$ )	-11,09	-11,49	-84,33	-24,81
$K_2$ (N/ $\mu\text{m}$ )	1,00	1,08	1,82	1,60
$K_3$ (N)	5,28	5,37	5,22	7,48
$\alpha_2$ ( $\mu\text{m}^{-1}$ )	-3,24	-4,54	-5816,59	-6,63

Tab. 1 : Tableaux de coefficients.

On peut remarquer que le coefficient  $K_1$  est plus important pour l'outil avec un angle de coupe négatif, ce qui peut être le signe d'un refus de coupe plus important que pour l'outil à angle de coupe positif.

### 3.1 Vers la simulation numérique

L'expérimentation permet aussi de trouver les paramètres matériaux nécessaires à la mise en place d'une simulation numérique.

Un premier point est l'identification du coefficient de frottement. D'après le modèle de Merchant [10], on a :

$$\frac{F_t}{F_c} = \tan(\mu - \alpha) \quad (4)$$

avec  $\mu$  le coefficient de frottement du couple matériau/ outil et  $\alpha$  l'angle de coupe nominal. On obtient alors :

$$\mu = \alpha + \arctan \frac{F_t}{F_c} \quad (5)$$

En traçant ce coefficient de frottement en fonction de l'épaisseur de copeau non déformé, on voit tout d'abord les limites de la modélisation de Merchant pour laquelle l'arête de coupe est parfaitement saillante : le coefficient de frottement a un comportement décroissant et convergent qui met en évidence le fait que l'angle de coupe effectif diverge de l'angle de coupe nominal pour les plus faibles épaisseurs.

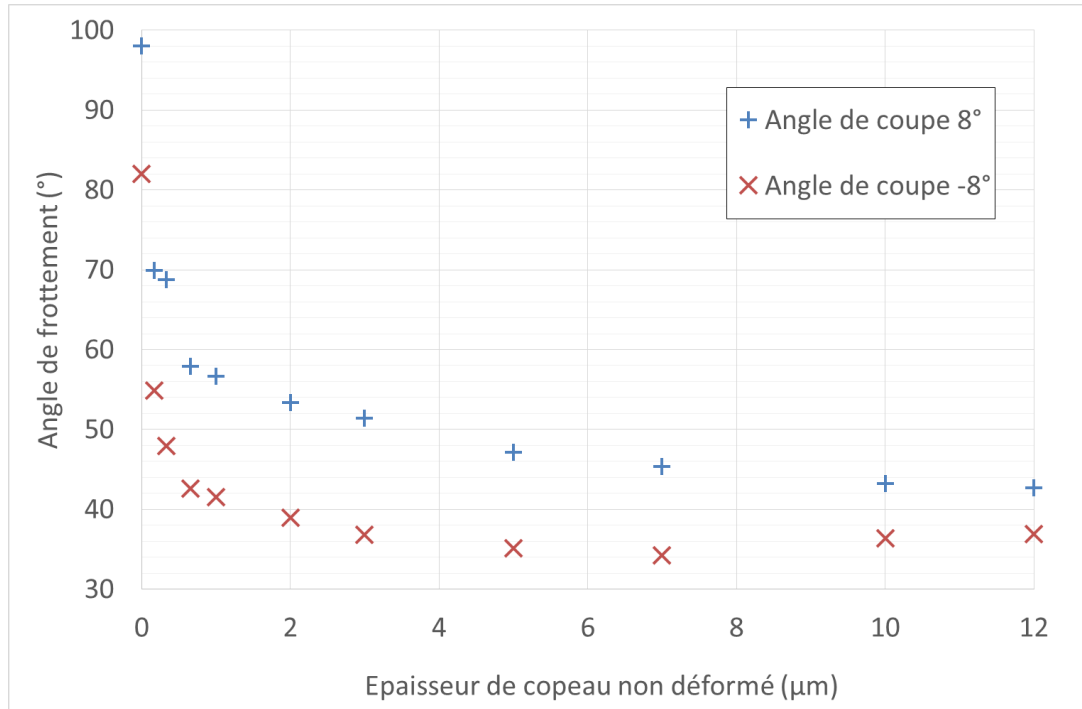


Fig. 4 : Evolution de l'angle de frottement théorique en fonction de  $h$ .

Une modélisation numérique de la coupe orthogonale a été définie en formulation SPH à partir d'un comportement de type Johnson-Cook en vue de simulations par le solveur LS-DYNA. Les premiers résultats de ces simulations réalisés avec le comportement d'un matériau proche du 40NiCrMo16 semblent en accord avec les observations faites précédemment mais ne montrent pas le saut d'effort observable, confortant ainsi l'hypothèse de l'écrouissage accumulé lors de l'expérimentation.

### 3.2 Application au micro-fraisage

La méthode de discrétisation d'arête est utilisée pour l'application du modèle au cas du micro-fraisage. L'algorithme utilisé ici est basé sur les travaux de Fontaine [11] en modifiant seulement l'expression des efforts élémentaires et sans utiliser la prise en compte du faux-rond radial. Cet algorithme a été implémenté dans le logiciel MIC2M lors de travaux précédents. La simulation directe sans identification donne des résultats plutôt corrects comme on peut le voir sur la figure 5 : les figures a) et c) sont les efforts de coupe suivant la direction perpendiculaire à la vitesse d'avance ( $F_x$ ) et suivant la direction de vitesse d'avance ( $F_y$ ) pour une avance par dent de 1 μm ; les figures b) et d) sont les efforts de coupe pour une avance par dent de 25 μm



suivant les mêmes directions. Néanmoins certains effets restent à identifier comme le faux-rond ou encore la flexion d'outil.

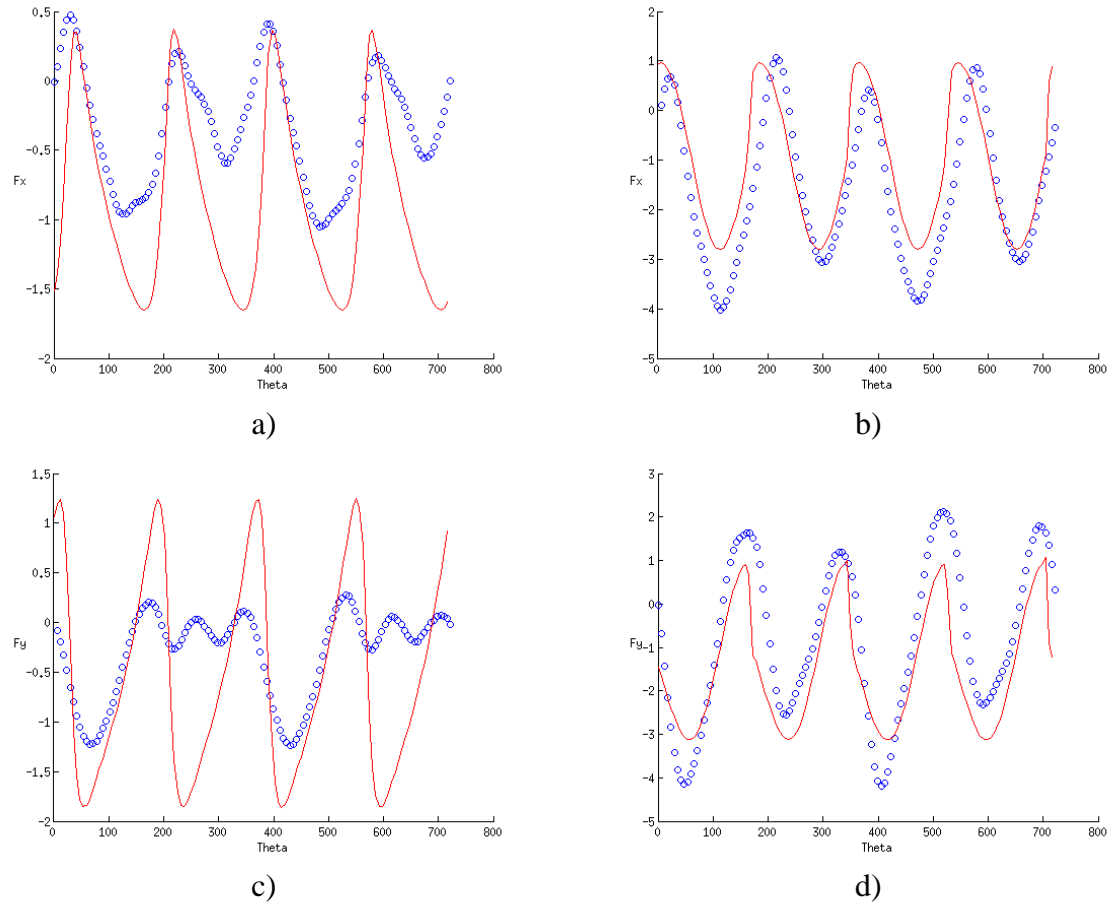


Fig. 5 : Simulation du micro-fraisage (trait continu) et résultats expérimentaux (points)

On remarque une différence notable pour la plus petite avance par dent de la forme du signal entre simulation et expérimentation : en effet les essais à faible avance par dent sont plus sensibles aux effets de faux-rond, de refus de coupe et de vibrations que pour les plus grandes avances. Ceci se vérifie d'ailleurs pour la comparaison à grande avance par dent où la forme des signaux semblent concorder à l'influence du faux-rond près.

#### 4 Conclusion et perspectives

Ce travail se concentre essentiellement sur l'expérimentation de la micro-coupe élémentaire. Cela permet notamment de mettre en évidence l'influence du rayon d'acuité d'arête (ou du défaut d'acuité considéré comme tel) sur les efforts de coupe et plus particulièrement pour des épaisseurs de copeau non déformé faibles. Il apparaît même un phénomène de labourage important pour les très faibles épaisseurs. Ces essais permettront de valider les simulations numériques mises en place et de pouvoir simuler rapidement les efforts de coupe en micro-fraisage en introduisant des lois de coupe adaptées.

En ce qui concerne la modélisation numérique, une simulation de l'essai de micro-coupe sur tube est en cours d'étude permettant en premier lieu, malgré des temps de calcul importants, de faciliter le lien entre essai expérimental et simulation de micro-coupe élémentaire beaucoup moins longue. Des essais de caractérisation du matériau sont aussi à mettre en place pour modéliser numériquement le comportement de celui-ci dans des plages de validité adaptées à l'usinage.

La prise en compte des effets dynamiques dans le module de fraisage de MIC2M permettra aussi d'approcher au mieux les résultats expérimentaux de micro-fraisage.

## Références

- [1] C. R. FRIEDRICH, P. J. COANE, M. J. VASILE, 1997, *Micromilling development and applications for microfabrication*. Microelectronic Engineering, Vol. 35, 367-372.
- [2] G. BISSACCO, H.N. HANSEN, J. SLUNSKY, 2008, *Modelling the cutting edge radius size effect for force prediction in micro milling*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 57, 113-116.
- [3] Y. ALTINTAS, X. JIN, 2011, *Mechanics of micro-milling with round edge tools*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 60, 77-80.
- [4] S.M. AFASOV, S.M. RATCHEV, J. SEGAL, 2010, *Modelling and simulation of micro-milling cutting forces*. Journal of Materials Processing Technology, Vol 210, 2154-2162.
- [5] C. R. FRIEDRICH, V. P. KULKARNI, 2004, *Effect of workpiece springback on micromilling forces*. Microsystem Technologies, Vol. 10, 472-477.
- [6] I. S. KANG, J. S. KIM, J. H. KIM, M. C. KANG, Y. W. SEO, 2007, *A mechanistic model of cutting force in the micro end milling process*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187-188, 250-255.
- [7] I. S. KANG, J. S. KIM, Y. W. SEO, 2008, *Cutting force model considering tool edge geometry for micro end milling process*. Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 22, 293-299.
- [8] J. FLEISCHER, V. SCHULZE, J. KOTSCHENREUTHER, 2009, *Extension of cutting force formulae for microcutting*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 2, 75-80.
- [9] F. RICHARD, 1999, <http://mic2m.univ-fcomte.fr/>
- [10] M. MERCHANT, 1945, *Mechanics of the metal cutting process*. American Institute of Physics.
- [11] M. FONTAINE, A. DEVILLEZ, D. DUDZINSKI, 2007, *Parametric geometry for modelling of milling operations*. International Journal of Machining and Machinability of Materials, Vol. 2, n° 2, 186-205.